

M. Dudeck<sup>1</sup>, S. Mazouffre<sup>2</sup>, S. Zurbach<sup>3</sup>, D. Arrat<sup>4</sup>,  
 S. Barral<sup>5</sup>, J. Kurzyna<sup>6</sup>, K. Makowski<sup>7</sup>, Z. Peradzyński<sup>8</sup>,  
 P. Rybka<sup>9</sup>, K. Moszyński<sup>10</sup>

## *Les moteurs à plasma pour les satellites de télécommunications*

### 1. Les satellites en orbite géostationnaire

Les satellites placés en orbite géostationnaire à 36000 km de la Terre dans le plan équatorial terrestre permettent une couverture de plus de 90% des continents. En 2008, 228 satellites sont dédiés à la transmission des programmes de télévision de nombreux pays, ils servent aussi pour la téléphonie et la transmission de données. On arrive à plus de 400 satellites opérant en orbite géostationnaire. Intervenant de plus en plus dans notre vie quotidienne, ils représentent un enjeu industriel important dans le domaine des télécommunications, de plus en plus concurrentiel et associé à un marché de plus en plus porteur économiquement.

Après la séparation du troisième étage d'un lanceur de type Ariane V, le satellite est placé sur une orbite elliptique très aplatie dont le point le plus éloigné de la Terre (apogée) est situé à 36000 km. Il est alors nécessaire de mettre en marche un ou plusieurs moteurs permettant de circulariser l'orbite, de la placer exactement dans le plan de l'équateur terrestre et de mettre le satellite à son poste de travail. Cette première phase nécessite de fortes poussées, de l'ordre du Newton, permettant de réaliser l'opération dans un minimum de

<sup>1</sup> (ndr) Groupement de Recherche CNRS-CNES-Snecma-Universités n°3161, « Propulsion par plasma dans l'espace » et Institut Jean le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Paris.

<sup>2</sup> (ndr) Laboratoire ICARE, CNRS, Orléans.

<sup>3</sup> (ndr) Snecma, groupe Safran, Vernon.

<sup>4</sup> (ndr) CNES, centre de Toulouse, Toulouse.

<sup>5</sup> (ndr) Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Magnetized Plasma Physics Department, Varsovie.

<sup>6</sup> (ndr) Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Magnetized Plasma Physics Department, Varsovie.

<sup>7</sup> (ndr) Institute of Fundamental Technological Research, IPPT / PAN, Varsovie.

<sup>8</sup> (ndr) Faculty of Mathematics, Informatics and Mechanics, Université de Varsovie.

<sup>9</sup> (ndr) Faculty of Mathematics, Informatics and Mechanics, Université de Varsovie.

<sup>10</sup> (ndr) Faculty of Mathematics, Informatics and Mechanics, Université de Varsovie.

temps, de l'ordre d'un mois. Il faut en effet que le satellite traverse rapidement la zone de radiation des ceintures de Van Allen et que l'opérateur puisse disposer du satellite dans les meilleurs délais. Une fois à son poste de travail, la position du satellite doit être corrigée quotidiennement car il va se déplacer sous l'action conjuguée du mouvement du Soleil et de la Lune, de l'effet gravitationnel dû à la non homogénéité de la terre, et enfin de la pression radiative du soleil. À l'altitude de l'orbite géostationnaire, les effets de frottement de l'atmosphère ambiante sont négligeables contrairement à ce qui se passe pour les satellites placés en orbite basse. Ramener le satellite à son poste demande des moteurs délivrant une poussée de l'ordre de 100 mN pour un satellite de 2-4 tonnes, 10-20mN pour un mini-satellite d'une centaine de kg. Les corrections s'effectuent principalement dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest par rapport à l'axe de la Terre. Au cours de sa mission qui peut durer plus de 15 ans, le satellite peut occasionnellement se retrouver au voisinage de débris spatiaux (près de 5700 objets de toutes sortes, de plus de 10 cm, circulent dans le voisinage de l'orbite géostationnaire) et, pour éviter une collision potentiellement destructive, il doit être déplacé, puis ramené à sa position de départ, d'où la mise en marche de moteurs de positionnement. Enfin, lorsque la mission est terminée, le satellite doit être retiré de sa position (désorbitation) pour laisser la place à un autre satellite et éviter d'encombrer l'orbite géostationnaire. Une réserve de carburant doit être conservée pour remonter le satellite de plusieurs centaines de km et le placer sur une orbite cimetièrè.

Le satellite doit parfois être également équipé de systèmes de positionnement précis, en particulier pour les missions scientifiques, ce qui requiert des poussées de l'ordre du micro-Newton pour son contrôle.

### 1.1 La propulsion par plasma

Pour changer la position d'un satellite, il faut modifier sa trajectoire et donc sa vitesse. Ce changement de vitesse consommera d'autant moins de carburant que la vitesse d'éjection du gaz sera élevée. On a donc intérêt à utiliser des moteurs éjectant les gaz à grande vitesse, afin de réduire au minimum la masse de carburant embarquée, donc le poids du satellite et le coût du lancement. Ce n'est pas le seul critère dans le choix du moteur, il faut savoir si on doit privilégier

la force de poussée, une force importante minimisant le temps de manœuvre, ou si on doit augmenter la vitesse d'éjection pour diminuer la consommation. Par ailleurs, le carburant doit être non toxique, facilement stockable et le moteur doit avoir un rendement énergétique élevé, une faible divergence de jet et être capable de fonctionner pendant près de 10000 h, avoir un faible poids et un faible encombrement et aussi pouvoir être mis en marche quotidiennement pendant 15 à 20 ans. Les contraintes sont donc sévères.

Dans la propulsion « chimique », un gaz est porté à haute température, puis détendu dans une tuyère. Plus la température sera élevée, plus la vitesse d'éjection sera importante, mais l'augmentation de la température du gaz est limitée par la résistance thermique des matériaux. Ce type de propulsion est couramment utilisé dans l'espace mais il conduit à des vitesses d'éjection faible, de l'ordre de quelques centaines de m/s.

La propulsion « plasma » repose sur un concept différent. Afin d'obtenir des vitesses d'éjection élevées, on crée des atomes ionisés que l'on va ensuite accélérer par un champ électromagnétique. On aura ainsi des vitesses très élevées qui ne dépendront que de la valeur du champ, ce qui ouvre des possibilités considérables en termes d'économie de carburant. L'idée est simple, elle a été proposée par Robert GODDARD en 1906 et par Konstantin TSIOLKOVSKI Tsiliakov en 1903.

Actuellement, deux types de propulseurs à plasma font l'objet d'études tout en étant déjà utilisés avec succès pour les satellites mais aussi pour les sondes d'exploration planétaire ; il s'agit des propulseurs à grilles (GIE) et des propulseurs à effet Hall (HET).

Les propulseurs à grilles comprennent, outre une source qui crée un plasma, plusieurs grilles parallèles portées à des potentiels différents. La première grille sert à repousser les électrons et les suivantes permettent d'accélérer les ions créés dans le plasma. De nombreux propulseurs à grilles ont été développés aux États-Unis. Le plus célèbre est le NSTAR (20-92mN) construit par Boeing satellite Systems et utilisé pour la mission NASA d'exploration de la Comète Borrelly (1998-2001). La sonde japonaise Hayabusa (lancement en 2003) devait étudier l'astéroïde Hitokava. Les satellites ASTRA 2A

sont équipés de moteurs de Boeing pour les corrections d'orbite. La mission DAWN (2007) dont le but est de permettre l'étude de la planète Cérès et de l'astéroïde Vesta utilise elle aussi un moteur ionique.

En Europe, l'Université de Giessen et EADS produisent des propulseurs nommés RIT dont un exemplaire (RIT10) a permis de sauver le satellite Artémis (juillet 2001) lancé sur une orbite trop basse de 5000 km après un lancement défectueux d'Ariane V.

Pour les satellites de télécommunications, ces propulseurs présentent des performances moins attractives que les propulseurs à effet Hall qui ont été retenus par l'agence spatiale française (CNES) en raison de leur moindre complexité, de l'absence de grilles et de leur meilleur rendement dans certaines conditions d'emploi.

### 1.2 Les propulseurs à effet Hall (HET)

Dans un propulseur à effet Hall et comme dans tout propulseur à plasma, il faut tout d'abord créer des ions, ce qui impose d'utiliser un gaz dont le potentiel de première ionisation est faible. Le xénon a été retenu, parce que son potentiel d'ionisation n'est que de 12,2 eV, et de préférence au césium ou au bismuth en raison de son absence de toxicité. Sa masse élevée, 131,29 g/mole, lui permet d'acquérir une forte quantité de mouvement avec un potentiel d'accélération modeste. L'ionisation du xénon est produite par la collision entre un atome neutre de xénon et un électron, mais comment réaliser des collisions ionisantes ? La réponse a été apportée par un concept suggéré par le Professeur A. I. Morozov du RRC Kurchatov dans les années 60. Il s'agit tout d'abord d'utiliser une source externe d'électrons et diriger ces électrons vers l'intérieur du moteur au moyen d'un champ électrique, mais ce n'est pas suffisant. En effet, le moteur doit fonctionner dans l'espace, milieu à très faible densité, où le nombre de collisions électrons-atomes de xénon est négligeable. Il faut donc piéger les électrons au moyen d'un champ magnétique afin d'augmenter la probabilité de collisions ionisantes. Pour réaliser le confinement des électrons dans le moteur, le champ magnétique devra généralement être de l'ordre de 0,02 Teslas. On aura donc créé des ions, mais encore faut-il qu'ils soient accélérés vers l'extérieur du moteur. Par chance, le plasma ainsi formé de xénon neutre, de xénon ionisé et d'électrons va de lui même générer un

champ électrique qui va extraire les ions sans avoir besoin de grilles polarisées. Cette extraction sera provoquée électrostatiquement, le champ magnétique étant trop faible pour agir sur la trajectoire des ions de xénon.

La vitesse d'éjection des ions atteindra 15 à 20 km/s en sortie du moteur, ce qui présente un intérêt considérable en terme d'économie de masse de carburant embarqué. On admet que pour un satellite de 4 t, l'économie par rapport à la propulsion chimique est d'environ 300 kg.

Depuis le lancement par l'URSS du satellite météorologique Météor en décembre 1971, plus de 200 propulseurs à effet Hall (SPT-50, 60, 70, 100) ont équipé les satellites de l'URSS et de la Russie, et ils continuent d'être utilisés sur les satellites russes de type GALS. Des SPT-100 sont placés sur des satellites occidentaux de télécommunications (Intelsat 10-2 et Immersat) d'EADS.

### 1.3 Les missions française et européenne : Stentor et Smart 1

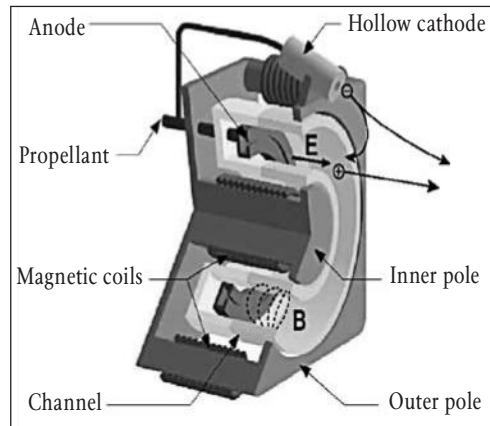
Dès 1993, des contacts ont eu lieu entre la Snecma, le CNES et M. le Professeur A.I. MOROZOV en vue de développer la technologie des propulseurs à effet Hall pour les satellites occidentaux. Les échanges ont été alors favorisés par une conjoncture permettant une plus grande ouverture des instituts russes vers les institutions européennes et américaines.

Du côté français, la participation s'est traduite par le développement par la Snecma de nouvelles familles de propulseurs à effet Hall (famille ATON, PPS1350, PPS1350-G, PPS5000), de même que par la création d'un Groupement de Recherche CNRS/CNES/SEP/ONERA en janvier 1996, régulièrement renouvelé depuis et placé sous la direction de M. le Professeur Michel DUDECK. Il s'agit maintenant du GDR CNRS/CNES/SNECMA/Universités 3161, créé pour une durée de quatre ans à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2008.

Quinze laboratoires du CNRS et des universités participent aux études coordonnées par ce groupement, abordant de manière complémentaire les aspects théoriques, les questions de modélisation et les aspects expérimentaux. En effet, si le principe

de fonctionnement d'un propulseur à effet Hall peut être décrit simplement en quelques lignes, il demeure des aspects physiques d'une grande complexité dont seule une partie est bien comprise et maîtrisée à l'heure actuelle. Citons par exemple, le problème fondamental du transport des électrons, sur lequel les physiciens butent depuis plusieurs dizaines d'années, celui de l'instabilité et du rôle des interactions entre le plasma et les surfaces internes du moteur.

Il s'agit non seulement de comprendre les processus physiques, mais aussi de s'appuyer sur cette compréhension pour développer des modèles physiques et numériques de caractère prédictif et proposer des améliorations significatives sur les propulseurs existants.



▲ Fig. 1. Schéma du principe de fonctionnement d'un propulseur à effet Hall.

Parallèlement et afin d'accroître les données sur le fonctionnement de ces propulseurs tout en continuant à démontrer la validité du concept dans le domaine spatial, deux projets d'envergure ont impliqué le CNES, la Snecma et le Groupement, il s'agit du satellite technologique Stentor et de la sonde interplanétaire Smart 1.

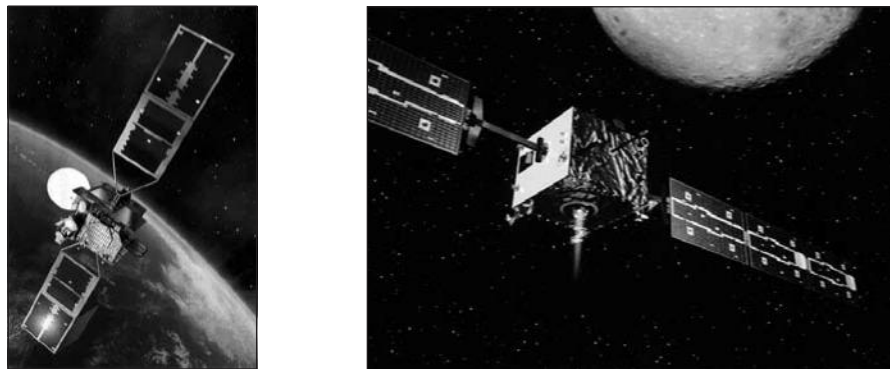
### *Le satellite Stentor*

Le satellite technologique CNES/DGA Stentor devait tester de nouvelles technologies, en particulier la propulsion par plasma. Il était équipé de deux propulseurs à effet Hall : un PPS1350 de Snecma et un SPT-100 de Fakel EDB (Russie). Cependant, l'échec

du lancement d'Ariane V en 2002 (vol 212) a conduit à la perte du satellite.

### *La sonde Smart 1*

La sonde européenne Smart-1 a été lancée par l'ESA le 23 septembre 2003 vers la Lune dont la connaissance reste incomplète. Cette mission réalisée avec un propulseur à effet Hall de la Snecma, le PPS1350-G, a été un plein succès avec 4958 heures de fonctionnement du propulseur. La mission s'est terminée en janvier 2005 avec un impact programmé sur le sol lunaire.



▲ Fig. 2. Satellite français Stentor et sonde européenne Smart 1.

## **2. La coopération franco-polonaise**

La coopération avec l'IPPT/PAN de Varsovie dans le domaine de la propulsion spatiale par plasma a débuté en 1998 avec une thèse à l'IPPT, celle de Serge BARRAL. La coopération avec l'Université d'Opole, plus récente, n'a commencé qu'en 2007.

### 2.1 Cadres de coopération

a) Accords de coopération CNRS/PAN : la coopération scientifique avec l'IPPT de 1998 à 2007 a eu lieu dans le cadre des accords annuels de coopération bilatérale signés entre l'Académie Polonaise des Sciences et le CNRS. La participation du CNRS était celle du laboratoire d'Aérothermique d'Orléans ;

b) CNES/Snecma : depuis 2001, les études entreprises à l'IPPT sont en partie financées dans le cadre de contrats signés entre le groupement et l'IPPT faisant référence aux contrats CNES. Cette coopération a

nécessité la mise en place d'un accord global de coopération signé en octobre 2007 ;

c) ESA : avec la Snecma, l'IPPT étudie dans le cadre d'un contrat de type Technical Research programme/ESA l'emploi de céramiques segmentées pour les propulseurs à effet Hall de forte puissance (5kW) ;

d) Programme PCRD 7 : avec la Snecma et le Groupement, l'IPPT participe au programme Hiper du PCRD 7 portant sur l'étude, la fabrication et le test d'un propulseur à effet Hall de forte puissance (20kW) ;

e) Chercheurs invités : la coopération avec l'Université d'Opole est basée sur l'invitation d'un chercheur grâce au soutien du CNRS et de la Région Centre.

## 2.2 Les thématiques étudiées

La coopération avec l'IPPT a porté et continue à porter sur différents aspects fondamentaux de la physique des propulseurs à effet Hall.

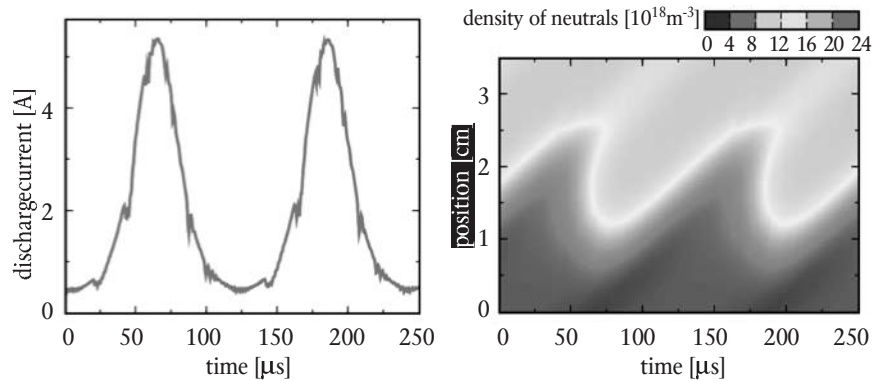
### a) Fluctuations à basse fréquence

Une modélisation à une dimension type fluide a été développée dès 1998 à l'IPPT afin de rendre compte des oscillations du plasma à basse fréquence (« breathing mode » : typiquement entre 15 et 20kHz) en tenant compte pour la première fois du couplage du plasma avec les parois intérieures du moteur. Le rôle des électrons émis par les parois a été très clairement mis en évidence et les résultats ont été validés par des expériences menées sur le banc d'essai Pivoine (laboratoire ICARE du CNRS d'Orléans). L'influence des propriétés de la zone de raccordement plasma-surface a pu ainsi être corrélée à des changements de mode de fonctionnement du propulseur. Les résultats obtenus ont par ailleurs été validés par le code hybride développé par l'Université de Toulouse (laboratoire Laplace).

Une étude sur le contrôle de ces oscillations basse fréquence est menée depuis un an par l'IPPT (S. BARRAL) en coopération avec l'Université de Madrid (E. AHEDO) et le laboratoire GEMaC du GDR



(M. GUYOT). Il s'agit de contrôler ces oscillations en intervenant sur le champ magnétique du moteur.



▲ Fig. 3. Oscillations à basse fréquence du courant de décharge et de la densité en xénon neutre dans un propulseur à effet Hall - code IPPT.

#### b) Fluctuations à moyenne fréquence

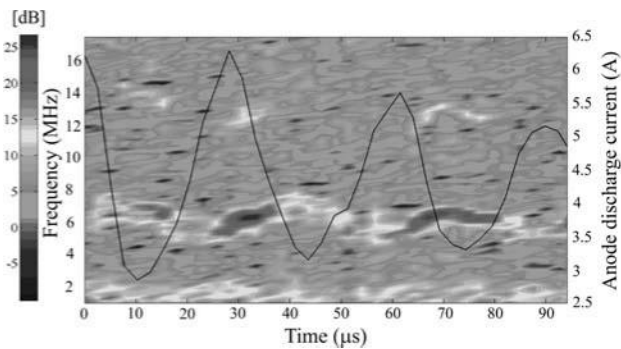
Les fluctuations des propulseurs à moyenne fréquence sont dans la gamme 100-500kHz (ondes de « transit time » des ions de xénon). S. BARRAL (IPPT) a proposé un modèle expliquant l'origine de ces fluctuations. En parallèle, une analyse des signaux enregistrés au moyen de sondes implantées à la sortie du moteur étudié sur le banc d'essai Pivoine (CNRS) a été réalisée avec J. KURZYNA (IPPT), G. BONHOMME (LPMIA – NANCY et GDR) et S. MAZOUFFRE (ICARE – CNRS et GDR). Cette analyse repose sur l'utilisation d'une méthode nouvelle (2002) appelée Empirical Mode Decomposition (EMD) : elle a permis de montrer pour la première fois les variations du temps de vol des ions se propageant axialement.

#### c) Fluctuations à haute fréquence

Les fluctuations à haute fréquence (entre 1 et 10 MHz) sont liées au mouvement des électrons dans le sens azimutal du canal du moteur. Ces fluctuations jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement du moteur et leur compréhension est encore imparfaite à l'heure actuelle. En quelques mots, le piégeage des électrons par le champ magnétique est fort et devrait empêcher les électrons de remonter vers l'anode du moteur. Il faut pour cela un processus physique

rendant possible ce transport et à la suite de M. le Professeur A. I. MOROZOV on a longtemps pensé au rôle des collisions des électrons avec les parois, les collisions électrons-atome de xénon étant en nombre trop faible.

Cette interprétation fait place à une nouvelle explication basée sur des fluctuations à haute fréquence du champ électrique. Elle s'appuie sur une modélisation dite « particulière » (A. HERON, J.-C. ADAM, CPHT – École Polytechnique), des mesures par diffusion collective (D. GRESILLON, LPTP – École Polytechnique), par sondes et antennes (S. MAZOUFFRE, ICARE et J. KURZYNA, IPPT) et une analyse des signaux enregistrés par la méthode de décomposition de type E.M.D.



◀ Fig. 4. Fluctuations à haute fréquence dans un propulseur à effet Hall (courbe en noir : courant de décharge ; en couleur : oscillations HF) – Thèse de L. ALBARÈDE (laboratoire d'Aérothermique).

À côté de la modélisation numérique du propulseur à plasma, le groupe de Varsovie travaille sur diverses instabilités qui sont observées dans les expériences. On parle essentiellement de trois types d'instabilités : instabilités de respiration, de temps de transit et à haute fréquence. Toutes jouent un rôle important, bien que ces rôles soient différents dans le fonctionnement des plasmas à propulseurs. L'instabilité de respiration va généralement de pair avec l'instabilité dynamique de systèmes 2-D dynamique connue sous le nom de proie – prédateur. Récemment S. BARRAL a développé une nouvelle approche qui donne un aperçu beaucoup plus approfondi du mécanisme fondamental de cette instabilité. L'instabilité de transit a également été étudiée à Varsovie. Il a été montré que sous certaines conditions la linéarisation des modes acoustiques ioniques peut être amplifiée, ce qui engendre de l'instabilité. En développant l'approche de G. B. WITHAM et en se fondant sur la violation de causalité, Z. PERADZYŃSKI a montré qu'une analyse similaire

peut très facilement être faite pour des systèmes non-linéaires en analysant la relation entre les caractéristiques du système original et celles du système réduit (en négligeant les termes du second ordre). En outre, en cherchant des solutions chaotiques de dimension infinie de certains systèmes dynamiques définis par des équations aux dérivées partielles, il a été constaté que les conditions de chaos peuvent être satisfaites par le système pour décrire les modes acoustiques ioniques. L'une de ces conditions exige que le taux d'amplification soit suffisamment élevé.

#### d) Zone d'ionisation et d'accélération

Le diagnostic par Fluorescence induite par laser (LIF) permet de mesurer la vitesse des ions et donc de remonter au champ électrique local et à la topographie en potentiel électrique. Afin d'améliorer la précision des mesures E. PAWELEC, Université d'Opole et S. MAZOUFFRE, ICARE ont étudié en détail la structure de certaines transitions optiques de l'ion  $Xe^+$  et de l'atome  $Xe$ .

#### e) Nouvelles céramiques

L'amélioration des performances des moteurs est un des objectifs essentiels auquel participe l'IPPT en proposant des améliorations sur la durée de vie des propulseurs tout en conservant le concept de propulsion à effet Hall. Il est proposé de limiter l'érosion du moteur en utilisant des parois segmentées. Un propulseur avec un canal ainsi segmenté a été testé avec succès sur le banc d'essai Pivoine, ce qui a permis de montrer que les performances « moteurs » étaient conservées avec même une augmentation de rendement pour les fortes tensions électriques appliquées. De nouveaux essais doivent avoir lieu en 2008-2009 avec un propulseur du GDR, le propulseur PPS100-ML. Ce procédé qui pourrait doubler la durée de vie des propulseurs fait l'objet actuellement d'un dépôt de brevet (IPPT/CNRS/Snecma).

### 3. Le futur

La coopération entre l'IPPT (Varsovie), les Universités de Varsovie et d'Opole d'une part et le CNES, la Snecma et les laboratoires du GDR « Propulsion par Plasma dans l'espace » porte sur les aspects fondamentaux de la physique des propulseurs à effets Hall tout en

proposant des innovations comme l'emploi de céramiques segmentées en vue d'une amélioration de la durée de vie en limitant l'érosion des parois ou encore le contrôle actif en pilotant le champ magnétique. La coopération est d'une grande richesse scientifique et les résultats originaux apportés sont incontestablement au plus haut niveau scientifique et reconnues par la communauté internationale.

### PUBLICATIONS :

- [1] N. GASCON, M. DUDECK, S. BARRAL, Wall material effects in stationary plasma thruster I : Parametric studies of an SPT-100, *Physics of Plasma*, vol. 10, n° 10, Oct. 2003, pp. 4123-4136.
- [2] S. BARRAL, K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, N. GASCON, M. DUDECK, Effect of wall material in stationary plasma thrusters II - Near-wall and in-all conductivity, *Physics of Plasma*, vol. 10, n° 10, Oct. 2003, pp. 4127-4152.
- [3] S. BARRAL, K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, M. DUDECK, Transit-time instability in Hall thrusters, *Physics of Plasma*, 12, 073504 (2005).
- [4] J. KURZYNA, S. MAZOUFFRE, L. ALBARÈDE, G. BONHOMME, K. MAKOWSKI, M. DUDECK, Z. PERADZYŃSKI, Spectral analysis of Hall effect Thruster plasma oscillations based on the Empirical Mode Decomposition, *Physics of Plasma*, 12, 123506 (2005).
- [5] S. MAZOUFFRE, E. PAWELEC, N. TRAN BICH, N. SADEGHI, Doppler-free spectroscopy measurements of isotope shifts and hyperfine components of near infrared xenon lines, *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, vol. 812, pp. 457-460 (2006).

### CONFÉRENCES :

- [1] S. BARRAL, K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, M. DUDECK, An alternative theory of transit-time oscillations in Hall Thrusters, *28<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conference, IEPC*, Toulouse, 17-21 March 2003.

- [2] K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, S. BARRAL, M. DUDECK, The azimuthal beam-plasma instabilities in Stationary Plasma thrusters, *28<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conference, IEPC*, Toulouse, 17-21 March 2003.
- [3] Z. PERADZYŃSKI, S. BARRAL, K. MAKOWSKI, M. DUDECK, Solutions with shocks for fluid model of Stationary Plasma Thruster, *28<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conference, IEPC*, Toulouse, 17-21 March 2003.
- [4] S. BARRAL, K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, M. DUDECK, Longitudinal oscillations in Hall thrusters, *4<sup>th</sup> Int. Spacecraft Propulsion Conference, ISPC 2004*, Chia Laguna, Sardinia, Italy, 2-9 June 2004.
- [5] J. KURZYNA, K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, L. ALBARÈDE, S. MAZOUFFRE, M. DUDECK, Empirical Mode Decomposition in Application to Analysis of the Oscillations in a Stationary Plasma Thruster, *2<sup>nd</sup> German-Polish Conference on Plasma Diagnostics for Fusion and Applications, GPPD 2004*, Cracow, Poland.
- [6] S. BARRAL, Z. PERADZYŃSKI, K. MAKOWSKI, M. DUDECK, Model of Gas Flow inside a Plasma Thruster, *XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, ICTAM*, 15-21 August 2004, Warsaw, Poland.
- [7] G. BONHOMME, C. ENJOLRAS, J. KURZYNA, S. MAZOUFFRE, L. ALBARÈDE, M. DUDECK, Spectral analysis of Hall effect thruster plasma oscillations based on the Hilbert-huang transform, *29<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conference, IEPC*, Princeton, USA, 31 October–4 November 2005.
- [8] S. BARRAL, Y. JAYET, E. VERON, S. MAZOUFFRE, P. ECHEGUT, M. DUDECK, Hall effect thruster with an AlN discharge chamber, *29<sup>th</sup> Int. Electric Propulsion Conference, IEPC*, Princeton, USA, 31 October–4 November 2005.
- [9] S. BARRAL, E. AHEDO, Theoretical Study of the Breathing Mode in Hall Thrusters, *42<sup>nd</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint propulsion Conference & Exhibits*, 9-12 July 2006, Sacramento, California.

- [10] K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, M. KOLANOWSKI, S. BARRAL, J. KURZYNA, M. DUDECK, Near Wall Conductivity in Hall Thrusters. Cylindrical geometry effect, *IEPC 2007 paper246*, 30<sup>th</sup> *International Electric Propulsion Conference*, *IEPC 2007-paper214*, 16-20 September 2007, Florence, Italy.
- [11] J. KURZYNA, K. MAKOWSKI, Z. PERADZYŃSKI, A. LAZURENKO, S. MAZOUFFRE, G. CODUTTI, M. DUDECK, Current and Plasma oscillation Inspection in PPS-X000-ML HET Thruster - EMD Approach, *IEPC 2007-paper239*, 30<sup>th</sup> *International Electric Propulsion Conf.*, *IEPC 2007-paper214*, 16-20 September 2007, Florence, Italy.
- [12] S. BARRAL, Theoretical Analysis of the Influence of the Power Supply on Breathing Oscillations in Hall Thrusters, *IEPC 2007-paper261*, 30<sup>th</sup> *Int. Electric Propulsion Conference*, *IEPC 2007-paper214*, 16-20 September 2007, Florence, Italy.